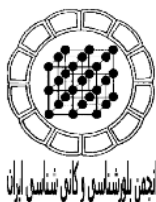
مجله
بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و چهارم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۹۵، از صفحهٔ ۶۳۵ تا ۶۴۶



کانی‌شناسی و پاراژنز کانسنگ Cu-Au-Bi منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم (شمال شرق اردستان)، مجموعه‌ی فلززایی انارک

بهزاد مهرابی[1]، ابراهیم طالع فاضل[2*]

۱- گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران
۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا

(دریافت مقاله: ۹۴/۱۰/۱۵، نسخه نهایی: ۹۵/۱/۲۵)

چکیده: مدل‌سازی‌های انجام شده بر مبنای تعادلات ترمودینامیکی و فیزیکوشیمیایی شاره، گویای آنست که مذاب‌های غنی از بیسموت قادرند مقادیر بالایی از طلا را از شاره‌ی گرمابی در تعادل با مذاب جاروب (scavenging) کنند. در این پژو.هش منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم در شمال‌شرق اردستان (بخش شمالی مجموعه‌ی فلززایی انارک) به عنوان نمونه‌ای از ذخایر گرمابی نوع IOCG و کانی‌سازی کوارتز-هماتیت ± سولفید با مجموعه عناصر آهن-مس-طلا-بیسموت مورد بررسی قرار گرفتند. در این میان، کانی‌های سولفوسالتی گروه فهلور، کانی‌های حاوی بیسموت و فلزات کمیاب (از قبیل طلا، بیسموت و الکتروم)، با هدف دستیابی به ترکیب شیمیایی و ارتباط زایشی با طلا بررسی شدند. کانی‌های گروه بیسموت به عنوان مهم‌ترین کانی‌های مؤثر در جاروب طلا در منطقه شامل: بیسموتینیت (با فرمول تجربی $Bi_{2.05}S_{2.9}$)، ایمپلکتیت (با فرمول تجربی $Cu_{0.56}Fe_{0.03}Bi_{1.2}S_{2.16}$) و بیسموت آزاد (با فرمول تجربی $Cu_{0.14}Bi_{0.86}$)، هستند. بنابر شواهد به نظر می‌رسد که الکترون‌های آزاد شده از کانی‌های احیا کننده نظیر پیروتیت و به موجب آن افزایش اکسیژن شاری، منجربه تبدیل Bi^{3+} به Bi^{0} و ته‌نشینی بیسموت در محیط شده است. پس از آن، با رخداد مگنتیت به عنوان فاز بافر پایدار، الکترون‌های آزاد شده منجربه تبدیل یون Au^{+} به Au^{0} در شاره و جذب آن به‌وسیله‌ی فاز بیسموت شده است.

واژه‌های کلیدی: *ژئوشیمی؛ کانی‌سازی کوارتز - هماتیت ± سولفید؛ بیسموت؛ جاروب طلا؛ کوه‌دم.*

مقدمه

کانه‌زایی و توزیع فلزات در کمربندهای فلززایی مختلف، تحت کنترل ویژگی‌های فیزیکوشیمی شاره، واکنش با سنگ دیواره و کنترل کننده‌های ساختاری رخ می‌دهد. واکنش میان شاره گرمابی داغ و سنگ دیواره در شرایط فیزیکوشیمیایی معینی، موجب رخداد کانی‌شناسی- شیمیایی، تغییرات بافتی و ساختی و در نهایت مهاجرت فلزات به‌وسیله‌ی شاره در بخش‌های مختلف یک ذخیره می‌شود. مجموعه‌ی این فرآیندها منجربه کانه‌زایی‌های چندفلزی متنوع در یک منطقه می‌شود. کمربند ارومیه- دختر با راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق در راستای کوهزاد زاگرس، میزبان دگرسانی‌ها و ذخایر گرمابی فراوانی است که مجموعه‌ی فلززایی انارک (Anarak Metallogenic Complex) در ایران مرکزی از جمله‌ی آن‌ها است. منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم در بخش شمالی مجموعه‌ی فلززایی انارک با طول‌شرقی ′۴۵ °۵۲ تا ′۵۳ °۵۲ و عرض‌شمالی ′۵۴ °۳۳ تا ′۰۱ °۳۴، در فاصله ۱۱۰ کیلومتری شمال‌شرق اردستان (استان اصفهان) قرار دارد. نخستین بررسی‌های پی‌جویی و زمین‌شناسی منطقه کوه‌دم طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۱ با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱,۲۵۰۰۰۰ انارک [۱] و ۱/۱۰۰۰۰۰ کوه‌دم [۲] توسط کارشناسان روسی شرکت تکنواکسپورت (ژئومتال) انجام شده است.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۸۱۳۸۳۸۱۴۶۰، نمابر: ۰۸۱۳۸۳۸۱۱۷۲، پست الکترونیکی: tale.fazel@gmail.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]

بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی و برداشت‌های ژئوفیزیکی توسط شرکت تکنواکسپورت، سه منطقه‌ی امیدبخش در کوه‌دم معرفی شدند که دارای بیهنجاری‌های چند فلزی از عناصر آهن، طلا، مس، بیسموت، نقره و مولیبدن است. در سال‌های اخیر با ادامه‌ی پی‌جویی‌های بیش از ۲۰۰۰ متر حفاری مغزه‌گیری در این منطقه انجام شد که تناژ ۵۰ تن طلا با عیار تقریبی ۳ گرم در تن برای آن براورد شد [۳]. در این بررسی سعی شد تا ضمن توصیف کانه‌زایی و ویژگی‌های سنگ نگاری کانسنگ و شیمی کانی‌ها، ویژگی‌های فیزیکوشیمی شاره و نقش مذاب بیسموتی در جاروب طلا در کانسنگ Cu-Au-Bi منطقه‌ی کوه‌دم مورد بررسی قرار گیرد.

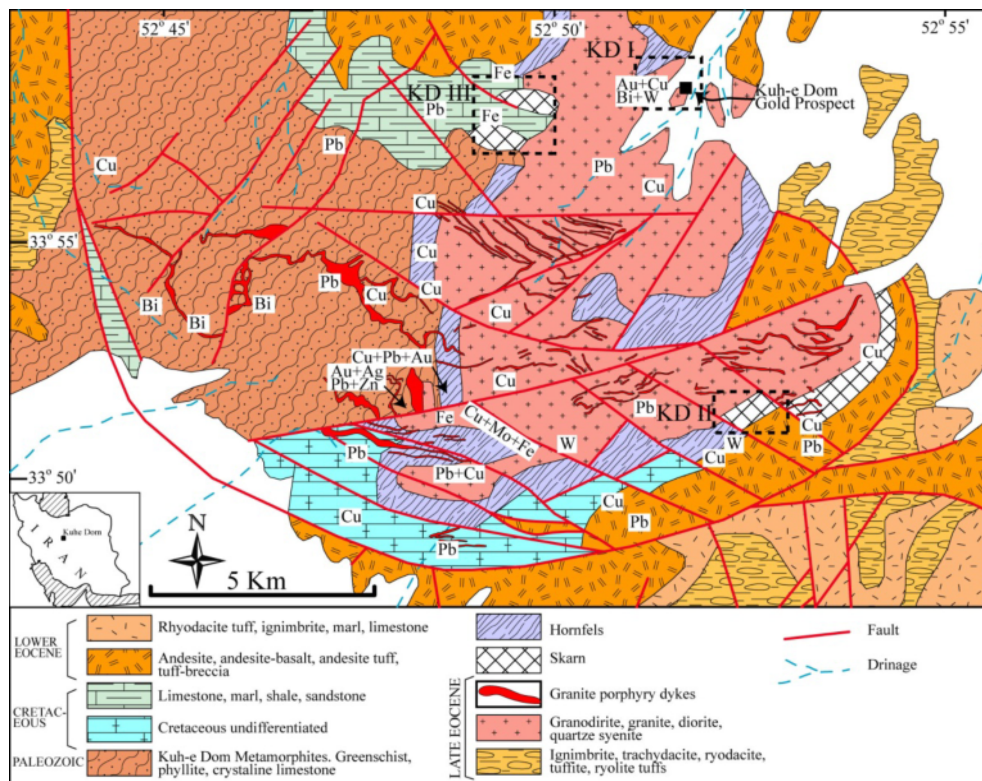
روش بررسی

به منظور بررسی سرشتی‌های کانه‌زایی، شیمی کانی‌ها و ژئوشیمی کانسار، پس از نمونه‌برداری با استفاده از روش‌های مناسب دستگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته و داده‌های به‌دست آمده مورد شناسایی قرار گرفتند. برای دستیابی به این اهداف، تعداد ۵۰ نمونه از بخش‌های مختلف کانی و رگه‌ها برداشت شدند که با انتخاب نمونه‌های مناسب تعداد ۴۰ مقطع صیقلی و نازک-صیقلی از این نمونه‌ها در کارگاه مقطع‌گیری دانشگاه خوارزمی و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد آماده‌سازی قرار گرفت. این مقاطع با استفاده نورهای عبوری و بازتابی با استفاده از میکروسکوپ قطبشی زایس، مدل Axioplan2 در آزمایشگاه دانشگاه خوارزمی تهران و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد بررسی قرار گرفتند. پس از بررسی‌های نوری و انتخاب کانی‌های مورد نظر، مجموعاً ۱۵ مقطع پس از آماده‌سازی، از جمله پوشش کربنی (carbon coating)، به روش‌های دستگاهی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدلLEO1450 VP و تجزیه ریزکاو الکترونی (EMPA) مدل Cameca SX100 مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش تجزیه ریزکاو الکترونی با ولتاژ شتاب-دهنده ۲۰ تا ۲۵ کیلوولت (kV)، جریان پرتو ۲۰ نانو آنگستروم (nA°) و قطر پرتو ۵ میکرون انجام شد. همچنین زمان متوسط آشکارسازی برای هر عنصر بین ۲۰ تا ۴۰ ثانیه و حد حساسیت دستگاه در حدود ۰٫۰۲ درصد وزنی (wt%) برای عناصر بوده است. این بررسی‌ها با هدف شناسایی فازهای کانیایی کمیاب، تهیه‌ی تصاویر الکترونی با بزرگنمایی بالا و دستیابی به عناصر Fe، Bi، Cu، Au، Ag، Sb، Te انجام شد. حروف اختصاری کانی‌های نامبرده در متن از Whitney and Evans [۴] اقتباس شده است.

زمین‌شناسی

مجموعه (همبافت) فلززایی انارک در بخش میانی ایران مرکزی، از شمال به ادامه بخش غربی گسل درونه، از جنوب غربی به منطقه-ی افیولیتی نائین- زواره و از جنوب به فروافتادگی نائین-انارک محدود می‌شود. منطقه‌ی انارک از دیرباز با ویژگی‌های فلززایی، ماگماتیسم، زمین‌ساختی و دگرگونی خاصی شناخته می‌شود که بررسی‌های زمین‌شناسی متعددی توسط [۵-۹] روی آن انجام شده است. کارشناسان روسی شرکت تکنواکسپورت [۱۰]، منطقه-ی انارک را به شش منطقه تقسیم کردند که منطقه کوه‌دم در بلوک شمالی این مجموعه قرار می‌گیرد. منطقه‌ی مورد بررسی بخشی از کمربند آتشفشانی- نفوذی ارومیه-دختر بوده که توده‌ی گرانودیوریتی کوه‌دم به سن ائوسن زیرین و گستردگی تقریبی ۴۰ کیلومتر مربع مهم‌ترین لیتولوژی این منطقه محسوب می‌شود. بررسی‌های سال‌سنجی U-Pb با استفاده از روش LA-ICP-MS روی بلورهای زیرکن، گویای گستره‌ی سنی ۰٫۴±۵۴ تا ۰٫۶±۴۹ میلیون سال (Ypresian stage) برای توده‌ی نفوذی کوه‌دم و دایک‌های وابسته به آن است [۱۱]. علاوه بر آن، سنگ‌های دگرگون پالئوزوئیک-مزوزوئیک، آهک‌های کرتاسه و واحدهای آتشفشانی- نیمه‌نفوذی ائوسن، نیز از دیگر واحدهای سنگی منطقه هستند (شکل ۱). بر اساس سال‌سنجی‌های K-Ar روی بلورهای آمفیبول و میکا در واحدهای فیلیت و شیست دگرگونه سنی معادل ۲۰۸ تا ۲۲۲ میلیون سال (معادل تریاس بالایی) برای آن‌ها به‌دست آمد [۹]، که موجب شده این واحدها به عنوان قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه محسوب شوند. واحدهای دگرگونه اغلب در غرب باتولیت کوه‌دم رخنمون دارند (شکل ۱). آهک‌های ضخیم تا میان لایه کرم تا قهوه‌ای رنگ کرتاسه در منطقه‌ی مورد بررسی اغلب در بخش‌های نزدیک به توده‌ی نفوذی کوه‌دم دستخوش تغییر ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی شد که موجب تشکیل اسکارن، سنگ آهک بلورین و در مواردی مرمر به ویژه در بخش‌های جنوبی باتولیت کوه‌دم شده است. سنگ‌های آتشفشانی- نیمه‌نفوذی ائوسن زیرین در منطقه متشکل از واحدهای سنگی آندزیت و بازالت است که به‌وسیله‌ی سنگ‌های ریولیت، ریوداسیت، توف و ایگنمبریت به‌طور ناپیوسته پوشیده شده است. در منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم بر پایه عملیات اکتشافی [۱۲] و پژوهش‌های انجام شده [۱۳-۱۵]، سه منطقه کانه‌زایی امید بخش معرفی شده‌اند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی- فلززایی منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم که موقعیت سه منطقه کانه‌زایی در آن نشان داده شده‌اند (با تغییرات از [۱۳])

این مناطق کانه‌زایی به ترتیب اهمیت شامل، بیهنجاری‌های کوه‌دم ۱ (کانسنگ رگه‌ای کوارتز-هماتیت±طلا)، کوه‌دم ۲ (کانسنگ رگه-رگچه‌ای و افشان فلزات پایه±تنگستن± مولیبدن) و کوه‌دم ۳ (کانسنگ اسکارن آهن وابسته به واحدهای سنگی کرتاسه)، هستند (شکل ۱). بیشترین حجم و عیار کانی‌سازی طلا (تا بیش از ۵۰ گرم در تن در یک نمونه) در منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم ۱ دیده شد که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

زمین‌شناسی کانسار

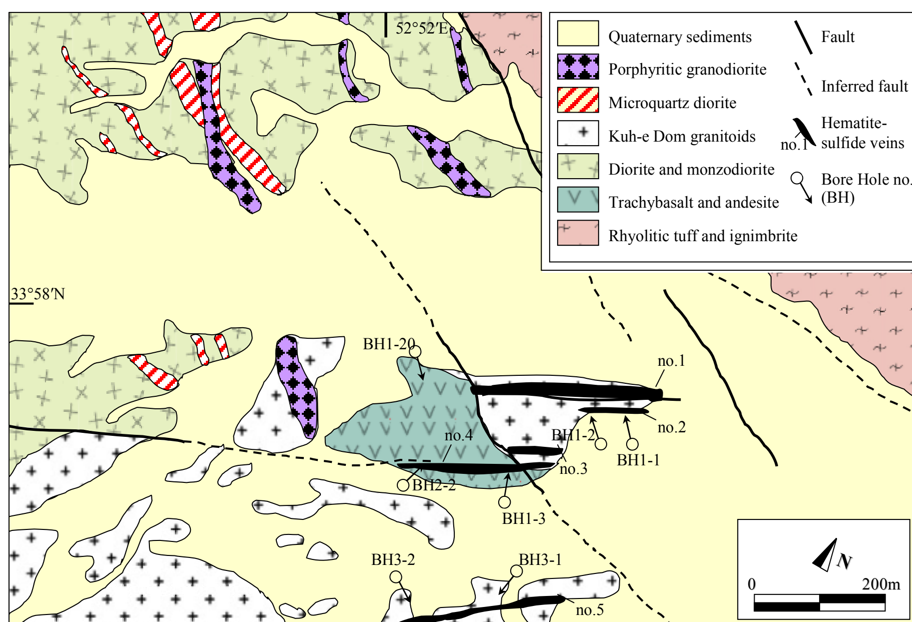
هندسه‌ی رگه‌ها

مغناطیس سنجی و ژئوالکتریک گویای وجود ۱۰ منطقه‌ی کانه‌دار در گستره‌ی کانه‌زایی کوه‌دم ۱ است [۱۲]. از این میان، تعداد ۵ افق معدنی کوارتز-هماتیت±سولفید به صورت رگه‌ای تا عدسی شکل با ماهیت روزادی و با راستای NE-SW در میزبان گرانیتوئید، تراکی بازالت و آندزیت‌های این گستره تشخیص داده شد (شکل ۲). در این منطقه ماده‌ی معدنی (رگه‌های ۱ تا ۵) به موازات یکدیگر با راستای تقریبی شرقی- غربی و شیب ۶۰ تا ۷۰ درجه به سمت جنوب‌غرب تشکیل شده است. این رگه‌ها به تقریب دارای درازای بین ۴۰ تا ۳۰۰ متر، عمق قائم ۳۰ متر و ضخامت کمینه‌ی ۰/۵ تا بیشینه‌ی ۱۵ متر (میانگین ۵ متر) با عیار میانگین ۲۱ درصد FeO_{total} هستند.

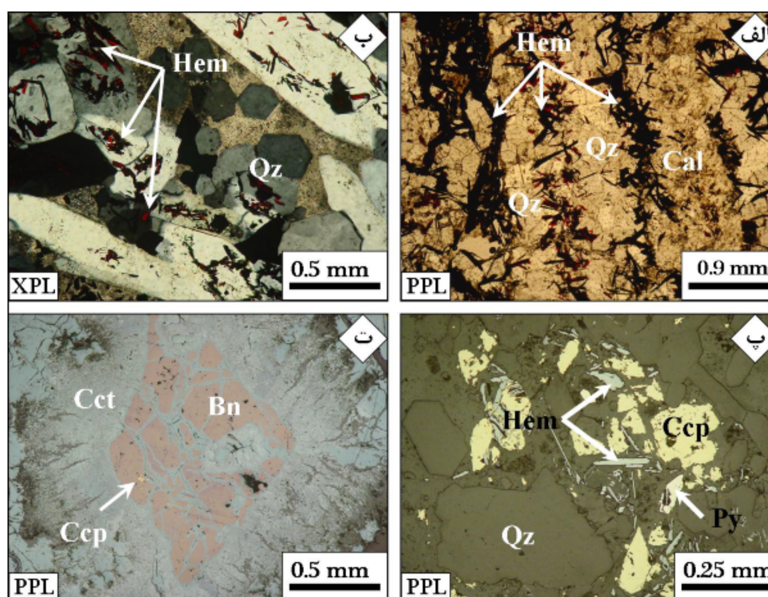
کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی کانسنگ Cu-Au-Bi

کوارتز به‌عنوان فراوانترین کانی در رگه‌ها با فراوانی تقریبی ۴۰ درصد حجمی اغلب همراه هماتیت و کانه‌های درون‌زاد و برون‌زاد سولفیدی تشکیل شده که با کانی‌های دگرسان مختلف همراهی می‌شود. ساخت و بافت‌های مشاهده شده در کوارتزهای منطقه شامل، بافت‌های قشری (crustiform)، کلوفورم (colloform)، برشی و رگه- رگچه‌ای است (شکل ۳ الف). پس از کوارتز، هماتیت‌های تیغه‌ای یا اسپکیولار به عنوان فراوانترین کانی تشکیل دهنده‌ی رگه‌ها اغلب به همراه کوارتز با فراوانی تقریبی ۳۰ درصد حجمی در رگه‌ها به‌عنوان کانه‌ی فلزی اصلی محسوب می‌شود. کانی‌سازی هماتیت به صورت بلورهای پراکنده و انباشتی همرشد با کوارتزهای شش گوش رخداده است (شکل ۳ ب). کانی‌های سولفیدی با فراوانی نسبی ۲۰ درصد حجمی به‌صورت افشان تا رگچه‌ای اغلب همراه با انباشت‌های بلوری هماتیت در میزبان کانی‌های کوارتز و کلسیت تشکیل شده‌اند. مهمترین کانی‌های سولفیدی در رگه‌ها به ترتیب فراوانی شامل کالکوپیریت و پیریت، کانه‌های برون‌زاد مس، مولیبدنیت، کانی‌های بیسموت-مس و کانی‌های سولفوسالتی گروه فهلور با اعضای انتهایی تتراهدریت تنانتیت است (شکل ۳ پ).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]



شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده منطقه‌ی کوه‌دم ۱ که در آن ۵ افق معدنی (no.1 تا no.5) کوارتز- هماتیت ± سولفید با راستای شرقی-غربی و شیب به سمت جنوب‌غرب به موازات یکدیگر تشکیل شده‌اند [۱۴]. شماره نقاط حفاری (BH) در شکل ذکر شده است.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی و سنگ نگاری کانسنگ Cu-Au-Bi منطقه‌ی کوه‌دم شامل: الف) بافت قشری متشکل از نوارهای کوارتز±کلسیت و ردیف‌هایی از هماتیت تیغه‌ای در میان آن‌ها، ب) تجمعات بلوری هماتیت تیغه‌ای به صورت همرشد با کوارتزهای خودشکل، پ) حضور کانی‌های سولفیدی کالکوپیریت و پیریت همراه هماتیت تیغه‌ای و دانه‌های پراکنده کوارتز و ت) کانی‌سازی برون‌زاد به‌صورت جانشینی کالکوسیت در حاشیه‌ی بورنیت همراه با ذرات ریز کالکوپیریت. حروف اختصاری برگرفته از [۴]، شامل: Ccp-کالکوپیریت، Py-پیریت، Hem-هماتیت، Qz-کوارتز، Bn-بورنیت، Cct-کالکوسیت، Cal-کلسیت.

ذرات بیسموت و الکتروم نیز به مقدار ناچیز با بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی در رگه‌ها تشخیص داده شد. طی این بررسی‌ها، ذرات آزاد طلا نیز با اندازه‌ی متوسط ۴۰ میکرون در میزبان کالکوپیریت و هماتیت مشاهده شد. مهم‌ترین کانه‌های برون‌زاد در رگه‌ها نیز شامل کالکوسیت، کوولیت، دیژنیت، مالاکیت، آزوریت و گوتیت است (شکل ۳ ت). کانی‌های تورمالین، مگنتیت، کلریت، روتیل و حاوی عناصر نادرخاکی (از قبیل مونازیت و آلانیت) نیز با فراوانی نسبی کمتر از ۲ درصد در رگه‌ها

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]

تشخیص داده شدند. علاوه بر این، سه نوع دگرسانی شامل دگرسانی‌های سدیک ± کلسیک (با کانی شاخص آلبیت در کنار رگه‌ها و افق‌های کانه‌دار)، پتاسیک (با کانی‌های شاخص فلدسپار پتاسیم، کوارتز و کلسیت در فاصله‌ای از رگه‌ها) و کوارتز-کلسیت±کلریت-سولفید (به‌طور پراکنده در رگه‌ها و توده‌ی نفوذی میزبان)، در منطقه‌ی مورد بررسی تشخیص داده شدند [۱۶].

مراحل کانه‌زایی

با توجه به شواهد صحرایی، آزمایشگاهی و روابط متقاطع کانی‌ها، دست کم سه مرحله‌ی کانه‌زایی به ترتیب شامل مرحله‌ی اکسیدی (کانه‌زایی هماتیت± مگنتیت)، مرحله‌ی سولفیدی مس-طلا-بیسموت (متشکل از دو زیرمرحله‌ی سولفیدی اولیه و تأخیری) و مرحله‌ی کانی‌سازی برون‌زاد (ناشی از جانشینی)، در منطقه‌ی کوه‌دم می‌توان تشخیص داد (شکل ۴). کانه‌زایی مرحله‌ی اکسیدی همراه با دگرسانی‌های دما بالای سدی و پتاسی رخداده که کانی‌های هماتیت± مگنتیت، حاوی عناصر نادر خاکی (نظیر آلانیت و مونازیت) و روتیل نیز همراه آن تشکیل شده است. طی رخداد کانی‌سازی سولفیدی، مجموعه عناصر فلزی پایه‌ی، گرانبهای (طلا و نقره)، بیسموت، مولیبدن و REE طی دو زیرمرحله‌ی تشکیل شده است. زیرمرحله کانی‌سازی سولفیدی اولیه به عنوان مهمترین رخداد کانی‌سازی‌های چندفلزی مس، بیسموت، طلا و نقره (شامل مجموعه کانی‌های گروه بیسموت و سولفوسالت‌های گروه فهلور) اغلب همراه با تورمالین، کلسیت و فلدسپارپتاسیم رخ داده است. بنابر تجزیه‌های ICP-MS انجام شده روی یک نمونه خالص‌شده با استفاده از آذرمحک (Fire assay)، عیار طلا در این بخش از کانه‌زایی در حدود ۶۰ گرم در تن نیز رسیده است [۱۴]. عیار میانگین بیسموت و مس نیز در این مرحله به ترتیب برابر ۱۰۰ گرم در تن و ۵ درصد وزنی بدست آمد. طی کانی‌سازی سولفیدی تأخیری نیز کانی‌های سولفیدی مولیبدنیت، پیریت و کالکوپیریت همراه دگرسانی کوارتز-کربنات (کلریت) تشکیل شده است. مجموعه کانی‌های فوق اغلب در شرایط کانی‌سازی برون‌زاد کانی‌های ثانویه با ماهیت جانشینی را تشکیل داد که از جمله آن‌ها می‌توان به‌مجموعه کانی‌های برون‌زاد مس، گوتیت و مارتیت (هماتیت ثانویه) اشاره کرد (شکل ۴).

شیمی کانی‌ها

وجود شاره‌ی غنی از عناصر چندفلزی آهن، مس، طلا، نقره، بیسموت، آنتیموان و نظایر آن موجب تنوع ترکیب و رخداد کانی‌های مختلف در رگه‌های کوارتز-هماتیت± سولفید منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم شده است. در این پژوهش کانی‌های سولفیدی اصلی (کالکوپیریت و پیریت)، کمیاب (کانی‌های گروه بیسموت و نمک‌های گروه فهلور) به همراه فلزات آزاد (طلا، بیسموت و الکتروم)، با هدف دستیابی به ترکیب شیمیایی آن‌ها مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفت. به منظور دستیابی به ترکیب این کانی‌ها و بازسازی فرمول تجربی آن‌ها (Empirical formula recalculation)، تجزیه ریزکاو الکترونی (EMPA) به همراه تصاویر الکترونی برگشتی (BSE) بر روی تعداد تقریبی ۲۰۰ نقطه انجام شد که نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

شکل ۴ توالی پاراژنتیک و مراحل زمانی رخداد کانی‌ها در منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم.

کانی‌های سولفیدی اصلی

کانی‌های پیریت و کالکوپیریت فراوانترین کانی‌های سولفیدی در رگه‌های کوارتز-هماتیت ± سولفید منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم هستند. پیریت با فرمول تجربی $Fe_{0.99}S_{1.98}$ و محتوای آهن بین ۴۶/۴ تا wt% ۴۷/۱ دارای عناصر فرعی طلا (۰/۰۵ تا wt% ۰/۰۸)، منگنز (۰/۰۳ تا wt% ۰/۰۹) و مقادیر ناچیز مس، کبالت، وانادیوم و تیتان مشخص می‌شود. کالکوپیریت نیز با فرمول تجربی $Cu_{0.96}Fe_{1.00}S_{2.00}$ و حضور عناصر اصلی مس بین ۳۱/۲ تا wt% ۳۴/۵ و آهن بین ۲۸/۷ تا wt% ۳۲/۱ و حضور مقادیر فرعی عناصر بیسموت (۰/۰۲ تا wt% ۰/۱۶)، آرسنیک (۰/۱ تا wt% ۰/۹)، طلا (۰/۰۱ تا wt% ۰/۰۸) و مقادیر ناچیز منگنز و نقره شناخته می‌شود (جدول ۱).

جدول ۱ مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین درصد وزنی (wt%) عناصر به دست آمده در ترکیب کانی‌های سولفیدی اصلی و کمیاب منطقه‌ی کوه‌دم با استفاده از تجزیه ریزکاو الکترونی (EMPA). (n= تعداد نقاط تجزیه شده؛ ND= عدم آشکارسازی).

عناصر	کالکوپیریت (۷=n)	پیریت (۱۰=n)	گروه فهلور (۱۰=n)	بیسموتینیت (۱۱=n)	ایمپلکتیت (۱۵=n)	بیسموت (۹=n)	طلا (۵=n)	الکتروم (۱=n)
مس (میانگین)	۳۱/۲۰-۳۴/۵۰ (۳۲/۸۵)	۰/۰۱-۰/۰۴ (۰/۰۳)	۱۵/۳۲-۲۵/۲۱ (۲۰/۲۰)	۰/۰۲-۰/۱۱ (۰/۰۷)	۱۳/۳-۱۷/۵ (۹/۲۱)	۳/۲۱-۵/۱۳ (۴/۲۰)	ND	۰/۰۵
آهن (میانگین)	۲۸/۷۰-۳۲/۱۰ (۳۰/۴۰)	۴۶/۴-۴۷/۱ (۴۶/۷۵)	۳/۲۱-۶/۵۴ (۴/۹۰)	۰/۰۲-۰/۰۵ (۰/۰۴)	۰/۲-۰/۸ (۰/۵۰)	ND	ND	ND
کبالت (میانگین)	ND	۰/۰۱-۰/۲۱ (۰/۱۱)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
وانادیوم (میانگین)	ND	۰/۰۱-۰/۱۵ (۰/۰۸)	ND	ND	۰/۰۱-۰/۰۳ (۰/۰۲)	ND	ND	ND
منگنز (میانگین)	۰/۰۱-۰/۰۳ (۰/۰۲)	۰/۰۳-۰/۰۹ (۰/۰۶)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
آرسنیک (میانگین)	۰/۱۰-۰/۹۰ (۰/۵۰)	ND	۴/۵۶-۷/۶۵ (۶/۱۰)	ND	ND	ND	۰/۰۱-۰/۰۳ (۰/۰۲)	ND
نقره (میانگین)	۰/۰۱-۰/۰۳ (۰/۰۲)	ND	۳/۴۵-۷/۴۲ (۵/۴۳)	ND	ND	۰/۰۲-۰/۰۶ (۰/۰۴)	۰/۰۲-۰/۵۲ (۰/۲۷)	۵۳/۴۳
آنتیموان (میانگین)	ND	ND	۳/۲۱-۱۰/۲۳ (۶/۷۲)	ND	ND	۰/۰۳-۰/۱۵ (۰/۰۹)	۰/۰۲-۰/۰۵ (۰/۰۵)	۰/۴۳
روی (میانگین)	ND	ND	۰/۳۲-۲/۱۰ (۱/۲۱)	ND	ND	ND	ND	ND
سرب (میانگین)	ND	ND	۰/۰۲-۰/۰۸ (۰/۰۵)	ND	ND	ND	ND	ND
جیوه (میانگین)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	۰/۱۵
تیتان (میانگین)	ND	۰/۰۱-۰/۰۳ (۰/۰۲)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
بیسموت (میانگین)	۰/۰۲-۰/۱۶ (۰/۰۹)	ND	۰/۰۳-۰/۲۱ (۰/۱۲)	۷۵/۲۳-۸۷/۰۳ (۸۱/۱۳)	۶۲/۴-۶۵/۲ (۶۳/۸۰)	۹۰/۳-۹۴/۲ (۹۲/۳۰)	ND	ND
طلا (میانگین)	۰/۰۱-۰/۰۸ (۰/۰۵)	۰/۰۵-۰/۰۸ (۰/۰۷)	ND	ND	ND	ND	۸۸/۳۲-۹۷/۲۳ (۹۲/۸۰)	۴۲/۲۳
تلور (میانگین)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	۰/۰۲-۰/۰۷ (۰/۰۵)	ND
گوگرد (میانگین)	۳۱/۲۰-۳۵/۲۰ (۳۳/۲۰)	۵۲/۸-۵۳/۳ (۵۳/۰۵)	۱۸/۵۴-۲۳/۳۲ (۲۱/۰۰)	۱۵/۲۳-۱۹/۴۳ (۱۷/۳۳)	۱۴/۷-۲۰/۰ (۱۷/۴۰)	۰/۰۲-۰/۰۷ (۰/۰۵)	۰/۰۱-۰/۰۳ (۰/۰۲)	۰/۰۳

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]

کانی‌های سولفیدی کمیاب

از جمله ترکیبات و کانی‌های سولفیدی کمیاب در منطقه‌ی کوه‌دم حضور کانی‌های سولفوسالتی گروه فهلور (با فرمول کلی $A_mB_nS_p$) و اعضای انتهایی تتراهدریت-تنانتیت است که با فرمول تجربی $(Cu_{7.78}Fe_{2.26}Ag_{1.3}Zn_{0.65})_{12}As_4Sb_4S_{13}$ شناخته می‌شوند. بنابر تجزیه‌های نقطه‌ای انجام شده عناصر اصلی مس (۱۵٫۳۲ تا ۲۵٫۲۱ wt%)، آهن (۳٫۲۱ تا ۶٫۵۴ wt%)، آرسنیک (۴٫۵۶ تا ۷٫۶۵ wt%)، نقره (۳٫۴۵ تا ۷٫۴۲ wt%)، آنتیموان (۳٫۲۱ تا ۱۰٫۲۳ wt%) و مقادیر ناچیز بیسموت و سرب و روی در کانی‌های سولفوسالتی گروه فهلور شناسایی شدند (جدول ۱). با توجه به حضور ترکیبات فلزی و شبه فلزی متعدد کانی‌های گروه فهلور پایه‌ی بررسی‌های رامدور [۱۷]، کانی‌های سولفوسالتی متعددی از این گروه می‌توان انتظار داشت که با استفاده از نمودارهای دوتایی و سه‌تایی عنصری می‌توان آن‌ها را از یکدیگر تفکیک کرد. نمودارهای دوتایی نسبت‌های عنصری Sb/(Sb+As) و Zn/(Fe+Zn) در مقابل مقادیر Ag در فرمول کانی (Ag atoms pfu) [۱۸]، از جمله‌ی این نمودارها است که با توجه به آن کانی‌های سولفوسالتی تنانتیت، تتراهدریت و فریبرجیت از یکدیگر تفکیک می‌شوند (شکل ۵ الف و ب).

کانی‌های گروه بیسموت با حضور سه کانی اصلی بیسموتینیت (فرمول تجربی $Bi_{2.05}S_{2.9}$)، ایمپلکتیت (فرمول تجربی $Cu_{0.56}Fe_{0.03}Bi_{1.2}S_{2.16}$) و بیسموت آزاد (فرمول تجربی $Cu_{0.14}Bi_{0.86}$) در رگه‌های کوارتز-هماتیت± سولفید منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم شناسایی شدند (شکل ۶). کانی بیسموتینیت با حضور عناصر اصلی بیسموت بین ۷۵٫۲۳ تا ۸۷٫۰۳ wt% و مقادیر ناچیز مس و آهن شناخته می‌شود. کانی ایمپلکتیت نیز با حضور عناصر اصلی مس بین ۱۳٫۳ تا ۱۷٫۵ wt% و بیسموت بین ۶۲٫۴ تا ۶۵٫۲ wt% و مقادیر فرعی آهن (۰٫۲ تا ۰٫۸ wt%) شناسایی شدند که مقادیر ناچیز وانادیوم نیز در ترکیب آن‌ها آشکار شد (جدول ۱). علاوه بر این، کانی ویتچنیت نیز با فرمول تجربی $Cu_{2.82}Bi_{0.85}S_{3.22}$ به طور ناچیز به همراه دیگر کانی‌های سولفیدی بیسموت‌دار منطقه شناسایی شد (شکل ۶ ت). با استفاده از تصاویر الکترونی برگشتی (BSE)، بافت‌های محلول جامد و میرمیکیتی یا کرمی‌شکل میان کانی‌های گروه بیسموت و سولفوسالت‌های گروه فهلور شناسایی شدند (شکل ۶). علاوه بر این با استفاده از بررسی‌های ریزکاو الکترونی، کانی‌های سولفیدی کمیاب دیگری با فرمول تجربی $Cu_{0.55}(Fe,Mn)_{0.11}Pb_{1.43}Bi_{3.3}S_{5.5}$ در نمونه‌ها تشخیص داده شد (شکل ۶ چ - خ) که ترکیب آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شد. با استفاده از محاسبه‌ی درصد مولار عناصر گوگرد، بیسموت و مجموع عناصر فلزی Cu+Pb+Fe در تجزیه‌های نقطه‌ای بدست آمده از کانی‌های گروه بیسموت، نمودار سه‌تایی این کانی‌ها رسم شد [۱۸] که در آن کانی‌های بیسموتینیت، ایمپلکتیت، ویتچنیت و بیسموت آزاد از یکدیگر قابل تشخیص است (شکل ۷).

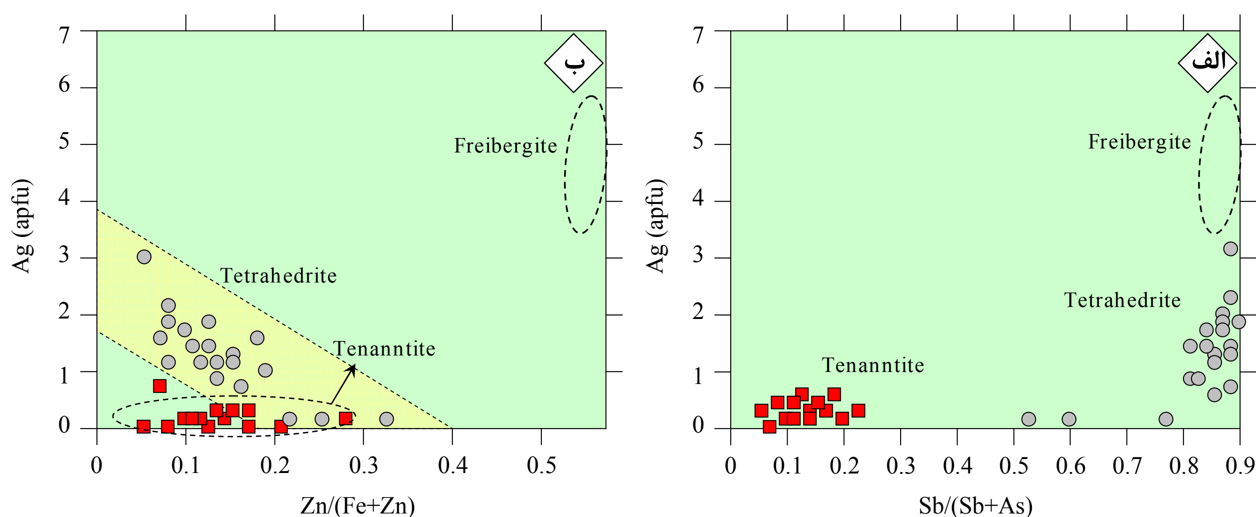
عناصر فلزی آزاد

علاوه بر ترکیبات و کانی‌های یاد شده، طی بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی، عناصر فلزی آزاد از قبیل طلا، بیسموت و الکتروم نیز در رگه‌های کوارتز-هماتیت±سولفید شناسایی شدند. الکتروم با ابعاد تقریبی ۲۰ تا ۶۰ میکرون و فرمول تجربی $Ag_{0.7}Au_{0.3}$ به عنوان کانی همراه طلا در نمونه‌ها تشخیص داده شد (شکل ۶ ب). طلای آزاد نیز با فرمول تجربی $Au_{0.99}$ (همراه مقادیر ناچیز آرسنیک، نقره و آنتیموان) و ابعاد تقریبی ۲ تا ۵۰ میکرون به‌طور پراکنده در میزبان کانی‌های هماتیت و کالکوپیریت مشاهده شد (شکل ۶ ث و ج). ذرات بیسموت آزاد با ابعاد تقریبی کمتر از ۲۰ میکرون نیز با فرمول تجربی $Cu_{0.14}Bi_{0.86}$ و حضور مقادیر ناچیز مس (۳٫۲۱ تا ۵٫۱۳ wt%) اغلب درگیر با کانی‌های گروه فهلور مشاهده شد. علاوه بر این، بیسموت آزاد به‌صورت حلقوی در اطراف بیسموتینیت تشکیل شده است (شکل ۶ خ).

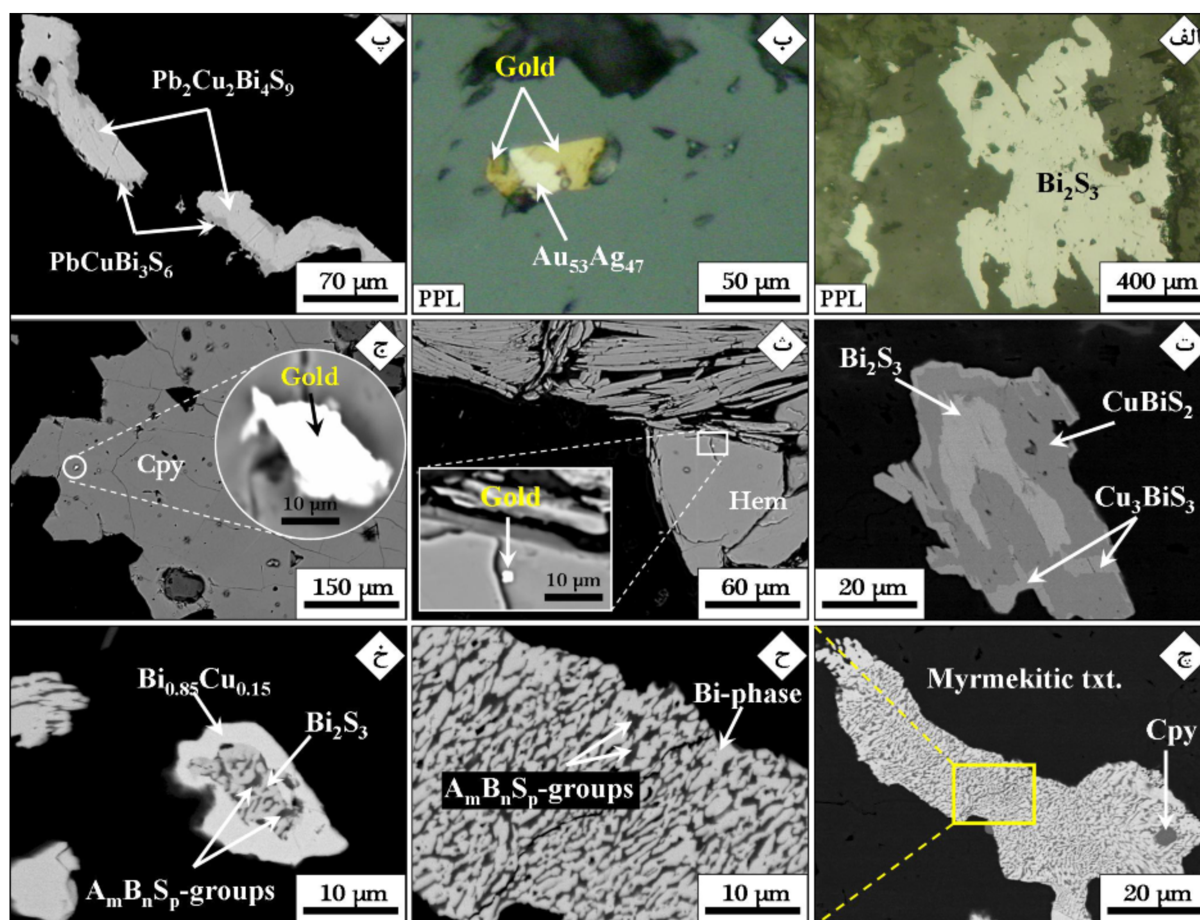
نقش مذاب بیسموتی در جدایش طلا از شاره‌ی گرمابی

از جمله پیشرفت‌های مهم در حوزه‌ی زمین‌شناسی اقتصادی، دستیابی به مفاهیم تشکیل مذاب به وسیله عناصر کالکوفیل با نرخ ذوب پایین (Low Melting Chalcophile Elements) یا LMC از قبیل Bi، Te و Pb در سیستم‌های بیسموت-طلا گرمابی است [۱۹-۲۱]. در این سیستم‌ها، فلز می‌تواند در اثر تحرک دوباره در اثر مذاب چندفلزی از سیستم گرمابی جدا شده و طی تغییرات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی محیط نهشته شود. یک سئوال مشخص در این زمینه می‌تواند نقش LMCE و دیگر عناصر چندفلزی در جدایش طلا و عناصر گرانبها از سیستم‌های گرمابی مختلف باشد. بیسموت به عنوان یک فاز عنصری مهم از LMCE در اغلب ذخایر گرمابی به همراه طلا مشاهده می‌شود. مدلسازی‌های صورت گرفته بر اساس تعادل‌های ترمودینامیکی توسط [۲۰، ۲۱]، گویای آنست که مذاب غنی از بیسموت قادرند مقادیر بالایی از طلا را از سیال گرمابی در تعادل با سیال گرمابی خارج کنند که به آن در اصطلاح جاروب یا Scavenging گویند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]

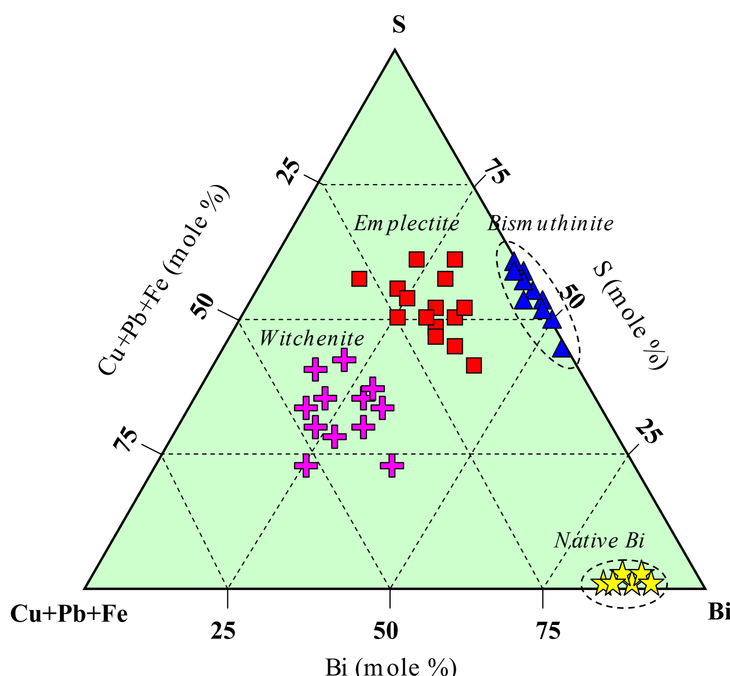


شکل ۵ نمودارهای دوتایی برای تشخیص کانی‌های سولفوسالتی گروه فهلور توسط [۱۸]، شامل: الف) نسبت عنصری Sb/Sb+As در مقابل مقادیر Ag در فرمول کانی (apfu) و ب) نسبت عنصری Zn/Fe+Zn در مقابل مقادیر Ag در فرمول کانی (apfu).



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) از کانی‌های سولفیدی بیسموت و گروه فهلور شامل: الف) بیسموتینیت (Bi_2S_3) در نور بازتابی، ب) طلای آزاد به همراه الکتروم ($Au_{53}Ag_{47}$)، پ) رخداد هاماریت ($Pb_2Cu_2Bi_4S_9$) و کروپکایت ($PbCuBi_3S_6$)، ت) بیسموتینیت در مرکز و کانی‌های ایمپلکتیت ($CuBiS_2$) و ویتچنیت (Cu_3BiS_3) در حاشیه، ث) رخداد طلای آزاد در ساختار هماتیت‌های تیغه‌ای، ج) طلای آزاد در میزبان کالکوپیریت، چ و ح) بافت میرمکیتی بین کانی‌های فاز بیسموت و گروه فهلور، خ) تشکیل حلقه‌ای از بیسموت آزاد ($Bi_{0.85}Cu_{0.15}$) در حاشیه آبگون- جامد کانی‌های بیسموتینیت و گروه فهلور.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]



شکل ۷ نمودار سه‌تایی درصد مولار (mole %) عناصر گوگرد، بیسموت و مجموع عناصر آهن- سرب- مس در کانی‌های بیسموت‌دار منطقه که بر اساس آن می‌توان کانی‌های گروه بیسموت را از یکدیگر تفکیک کرد [۱۸].

در سیستم‌های گرمابی که این پدیده رخ می‌دهد، این واکنش‌ها در موارد زیادی به حضور کانی‌های بیسموت‌دار وابسته است [۲۲، ۲۳]. ضریب توزیع طلا میان فاز آبگین و کانی‌های بیسموت‌دار به عواملی از قبیل شیمی شاره، فشار، دما و نسبت طلا در فاز مذاب به طلا در فاز آبگون وابسته است که در این نسبت باید بیش از $۱۰^{۷}$ در سیستم‌های طلای نوع کوهزایی با دمای ۳۰۰ درجه و pH معادل ۵ باشد [۲۱]. سیستم دوتایی طلا- بیسموت به طور ایده آل مناسب برای نمایش فازهای مختلف بیسموت- طلا است که در آن سیستم به طور کلی از فازهای طلا، بیسموت و مالدونیت (Au_2Bi) با نقطه‌ی یوتکتیک ۱۳ درصد وزنی بیسموت و دمای ۲۴۱°C تشکیل می‌شود [۲۰، ۲۴]. عناصر طلا و بیسموت در سیستم‌های گرمابی به ترتیب با ظرفیت‌های Au^{+}/Au^{3+} و Bi^{3+} انتقال می‌یابد که هنگام تشکیل با گرفتن الکترون به صورت Au^0 و Bi^0 خنثی نهشته می‌شود. در این خصوص احیا کنندگانی از قبیل پیروتیت و گرافیت نقش تأمین الکترون را به عهده دارند.

یک محلول غنی از اکسیژن حاوی بیسموت و طلا در اثر افزایش دما از ۲۵۰ تا ۳۰۰ °C با مصرف تدریجی اکسیژن محلول نسبتاً احیای ایجاد شده که در این مرحله مگنتیت در نتیجه واکنش پیروتیت به صورت زیر تشکیل می‌شود.

واکنش (۱)

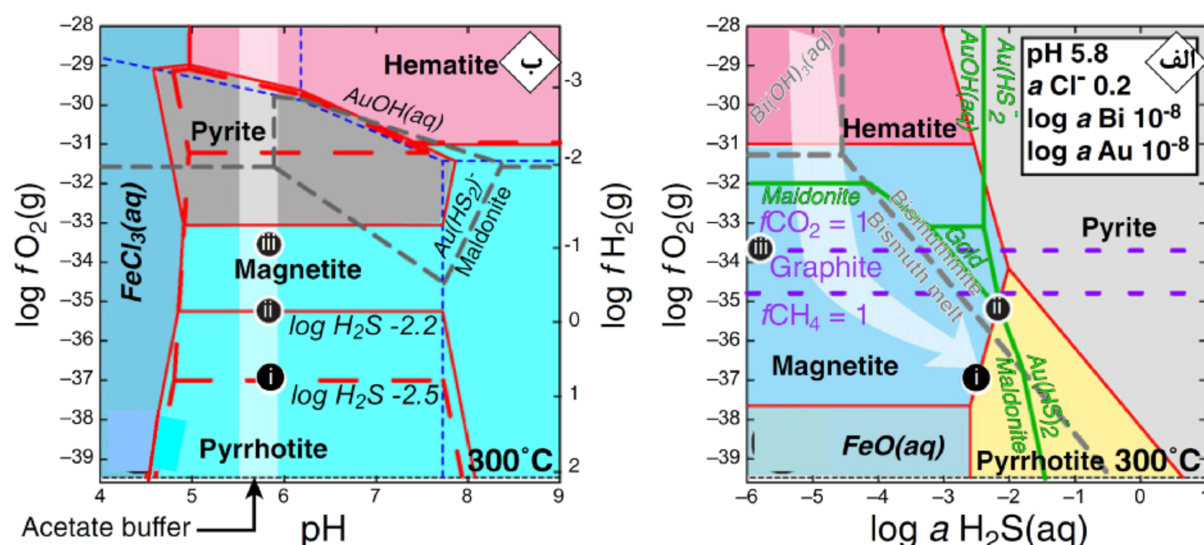


$$3FeS+0.5O_2+3H_2O\leftrightarrow Fe_3O_4+3H_2S \quad \Delta V=-18vol\%$$

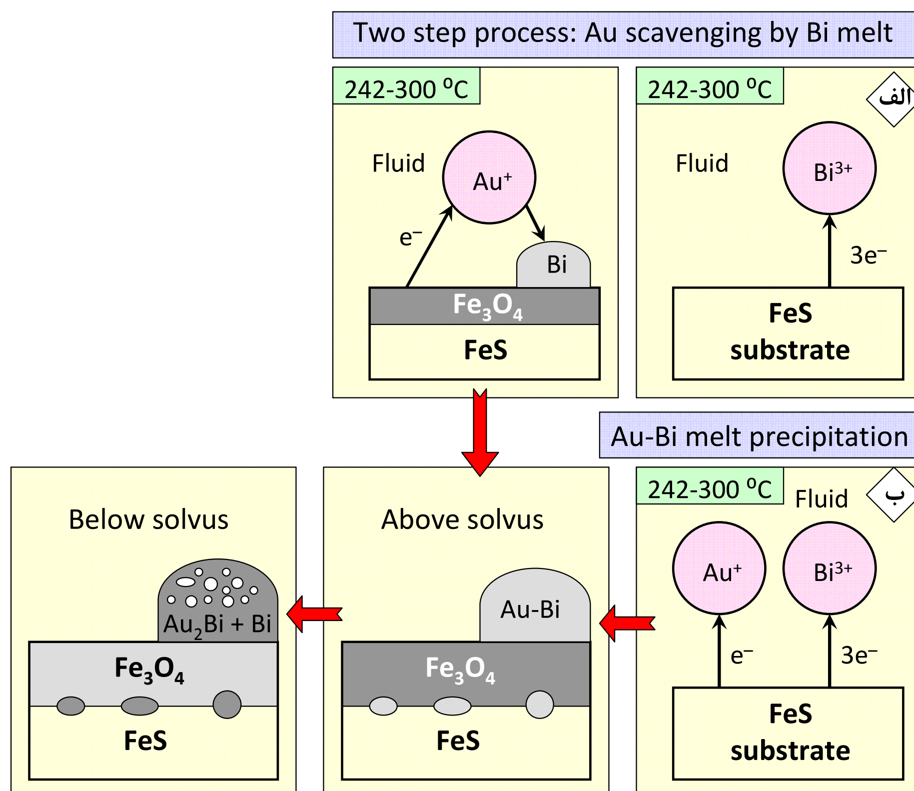
چنانکه مشاهده می‌شود، طی این واکنش به مقدار ۱۸ درصد حجم کانی مورد نظر کاهش یافته و در نتیجه‌ی آن، فضای خالی مگنتیت به‌وسیله‌ی مذاب بیسموت اشغال می‌شود [۲۱، ۲۵ و ۲۶]. در این واکنش با کاهش گوگرد در محیط، بیسموتینیت (Bi_2S_3) به بیسموت (Bi) تبدیل شده و بیسموت به صورت هاله‌ای در اطراف کانی‌های دیگر تشکیل می‌شود (شکل ۶ خ). در شکل ۸ نمودارهای دوتایی تغییرات لگاریتمی فعالیت H_2S در مقابل لگاریتم fO_2 (شکل ۸ الف) و نمودار دوتایی تغییرات pH در مقابل لگاریتم fO_2 (شکل ۸ ب) [۲۱، ۲۶] ارایه شدند که در آن روند پایداری مذاب بیسموت- طلا نسبت به کانی‌های آهن‌دار در شرایط آزمایشگاهی نشان داده شده است.

با توجه به بررسی‌های میانبارهای شاری روی رگه‌های کوارتز- هماتیت± سولفید منطقه پی‌جویی کوه‌دم دمای ۱۳۰ تا ۳۲۰ °C و شوری ۵ تا ۳۵ درصد معادل نمک طعام روی این رگه‌ها به دست آمده است [۱۵]. در مدل‌های ارائه شده از [۲۱]، دست کم دو مدل برای تشکیل طلا از مذاب بیسموتی در دمای تقریبی ۲۵۰ تا ۳۰۰ °C مطرح شد که به صورت نموداری در شکل ۹ این دو مدل نشان داده شدند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]



شکل ۸ نمودارهای دوتایی چگونگی پایداری مذاب بیسموت-طلا نسبت به کانی‌های آهن‌دار در شرایط تجربی و دمای ۳۰۰°C [۲۶،۲۱]. الف) نمودار دوتایی لگاریتم اکتیویته H_2S (محلول) در مقابل لگاریتم fO_2 (گاز) که در آن پایداری مذاب طلا-بیسموت با pH بافر در حوزه‌ی کانی‌های مگنتیت و پیروتیت قرار گرفته؛ همانطور که جهت پیکان نشان می‌دهد تحول سیال گرمابی از سیال اکسیدان به سمت سیال با ترکیب احیایی توسط کانی‌های بافر مگنتیت/پیروتیت کنترل می‌شود و ب) حوزه‌ی پایداری و انحلال‌پذیری کانی‌های آهن و طلادار در نمودار دوتایی log fO_2–pH که بر اساس محتوای H_2S در گستره‌ی پیروتیت (i) و مگنتیت (ii) قرار می‌گیرد.



شکل ۹ مدل‌های نموداری تشکیل مذاب طلا-بیسموت (با تغییرات از [۲۱]). الف و ب) مدل اول: تشکیل غیرهمزمان یون‌های طلا و بیسموت در شاره‌ی گرمابی و جدایش یون طلا به‌وسیله‌ی فاز آبگون بیسموتی با افزایش گریزندگی اکسیژن و نهشت آن در فضای خالی مگنتیت، پ، ت و ث) مدل دوم: تشکیل همزمان یون‌های بیسموت و طلا در سیال و احیاء آنها به وسیله پیروتیت طی دو مرحله بالای سولووس و زیر منحنی سولووس. با توجه به عدم مشاهده پیروتیت در منطقه، احتمالاً مدل نخست با شرایط کانی‌سازی منطقه کوه‌دم نزدیکتر است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]

در مدل نخست، الکترون‌های آزاد شده از پیروتیت ناشی از افزایش اکسیژن شاری منجربه تبدیل Bi^{3+} به Bi^0 و ته‌نشینی بیسموت می‌شود؛ پس از آن با تشکیل مگنتیت به عنوان فاز بافر پایدار، الکترون آزاد شده از آن منجربه تبدیل یون Au^+ به Au^0 در شاره و جذب آن به‌وسیله‌ی فاز بیسموت می‌شود (شکل ۹ الف). در مدل دوم حضور همزمان یون‌های بیسموت و طلا در شاره، با احیای آنها با فاز پیروتیت (FeS) نوعی از کانی‌سازی پراکنده دانه-ی طلا و بیسموت به همراه پیروتیت انجام شده که به تدریج با افزایش اکسیژن و تشکیل مگنتیت، لایه‌ی غنی از طلا-بیسموت در فضای خالی مگنتیت تشکیل می‌شود. پس از آن به تدریج با کاهش دما و محتوای گوگرد محیط، در حوزه‌ی زیر سالووس فازهای بیسموت به همراه مالدونیت (Au_2Bi) تشکیل می‌شود (شکل ۹ ب). با توجه به عدم کانی‌سازی پراکنده دانه، بیسموت و طلا همراه پیروتیت و نیز عدم مشاهده‌ی مالدونیت در منطقه کوه‌دم، به نظر می‌رسد که مدل نخست تقارن بیشتری با کانی‌سازی طلا و بیسموت در منطقه کوه‌دم داشته و فرآیند نهشت طلا در منطقه در اثر فاز بیسموت انجام شده است.

برداشت

با توجه به شواهد صحرایی، آزمایشگاهی و مراحل رخداد کانی‌ها، سه مرحله کانه‌زایی شامل مراحل اکسیدی، سولفیدی مس-طلا-بیسموت و جانشینی (برون‌زاد)، در منطقه پی‌جویی کوه‌دم تشخیص داده شد. در این میان، کانی‌سازی سولفیدی، به عنوان مهمترین گام رخداد عناصر چندفلزی مس، بیسموت، طلا و نقره از اهمیت بالایی برخوردار بوده و اغلب همراه با کانی‌های تورمالین، کلسیت و فلدسپار پتاسیم رخ داده است. بر اساس بررسی محققان مختلف، عناصر کالکوفیل با نرخ ذوب پایین نظیر بیسموت، سرب و تلور به عنوان یک فاز عنصری مهم در اغلب ذخایر گرمابی به همراه طلا محسوب می‌شوند که نقش مهمی در جاروب عناصر گرانبها و کم غلظت (نظیر طلا، نقره و عناصر گروه پلاتین) در سیستم‌های گرمابی بر عهده دارند. مدلسازی‌های صورت گرفته بر اساس تعادل‌های ترمودینامیکی گویای آنست که مذاب‌های غنی از بیسموت قادرند مقادیر بالایی از طلا را از سیال گرمابی در تعادل با مذاب خارج کنند. با توجه به عدم وجود کانی‌سازی پراکنده بیسموت و طلا همراه پیروتیت و نیز عدم مشاهده مالدونیت در منطقه پی‌جویی کوه‌دم به نظر می‌رسد جذب و رخداد طلا در این منطقه به‌وسیله‌ی فاز بیسموت انجام شده باشد. بنابر بررسی‌های انجام شده، شاره‌ی در تعادل با مگنتیت و پیروتیت بیش از آنکه در حوضه پایداری بیسموتینیت قرار داشته باشد به دلیل نقطه‌ی ذوب پایین بیسموت (271 °C) در این حوضه، پایداری ترمودینامیکی بیشتری نشان می‌دهد. این پایداری ممکن است با کاهش میزان گوگرد و افزایش اکسایش محیط همراه باشد که طی آن فاز بیسموت به صورت حلقه‌ای در اطراف بیسموتینیت ظاهر شود.

مراجع

[1] G.S.I (Geological Survey of Iran)., "*Geological map of Iran 1:100,000 series*", Sheet 6557, Kuh-e Dom (1981).

[2] G.S.I (Geological Survey of Iran)., "*Geological map of Iran 1:250,000 series*", No.G7, Anarak (1979).

[۳] شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، *"مطالعات اکتشافات تفصیلی آنومالی‌های طلا و مس منطقه کوه‌دم"* (۱۳۸۸).

[4] Whitney D.L., Evans B.W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*". American Mineralogist (2010) 95, 185–187.

[۵] نبوی م.ح.، هوشمندزاده ع.و.، حمدی ب.، *"نکته‌ها و پیچیدگی‌هایی از زمین‌شناسی دگرگونه سنگ‌های منطقه انارک-خور جندق (ایران مرکزی) در پیوند با کارهای زمین‌شناسی"*، شرکت تکنواکسپورت (ژئومتال) (۱۳۶۳).

[۶] خلعتبری ر.، *"پلوتونیسم ترشیری منطقه اردستان و ایران مرکزی"*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۱).

[۷] سامانی ب.، *"فلززایی و ایالت‌های متالوژنی ایران"*، سیزدهمین گردهمایی علوم‌زمین سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۳).

[8] Bagheri S., Stampfli G.M., "*The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications*", Tectonophysics (2008) 451, 123–155.

[9] Zanchi A., Zanchetta S., Garzanti E., Balini M., Berra F., Mattei M., Muttoni G., "*The Cimmerian evolution of the Nakhlak–Anarak area, Central Iran, and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin in Brune"t*, M.F., Wilmsen, M. and Granath, J. W. (eds) South Caspian to Central Iran Basins. The Geological Society, London, Special Publications (2009) 312, 261–286.

[10] Technoexport, "*Integrated Geophysical Studies in Anarak Area, Central Iran*", Ministry of Mines and Industries Geological and Mineral Survey of Iran (1979).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]

[۱۱] سرجوقیان ف.، کنعانیان ع.، اثنی عشری ا.، احمدیان ج.، *"سن سنجی توده نفوذی کوه دم، دایک ها و آنکلاوهای موجود در آن به روش اورانیوم-سرب"*، فصلنامه علوم زمین (۱۳۹۴) ۹۵، ۱۴۵ تا ۱۵۴.

[12] Technoexport, "*Report on detailed geological prospecting in Anarak area (Central Iran), Kuhe Dom, Rizab-e Maryam, Chah Alikhan Locations*", Ministry of Mines and Industries Geological and Mineral Survey of Iran, (1981) Report No 9.

[۱۳] ربیعی م.، *"اکتشافات ژئوشیمیایی ناحیه کوه‌دم و بررسی ژنز اندیس طلای آن"*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی تهران (۱۳۸۵) ۱۳۰ص.

[۱۴] طالع فاضل ا.، *"موقعیت تکتونوماگمایی و ترکیب سیال کانه‌ساز رخداد عناصر آهن (مس-طلا-بیسموت-نقره) منطقه پی‌جویی کوه‌دم، مجموعه فلزایی انارک"*، رساله دکتری، دانشگاه خوارزمی تهران (۱۳۹۳) ۲۳۳ ص.

[15] Tale Fazel E., Mehrabi B., Tabbakh Shabani A.A., "*Kuh-e Dom Fe–Cu–Au prospect, Anarak Metallogenic Complex, Central Iran: a geological, mineralogical and fluid inclusion study*". Mineralogy and Petrology (2015) 109, 115-141.

[۱۶] مهرابی ب.، طالع فاضل ا.، طباخ شعبانی ا.ع.، *"بررسی ژئوشیمی سنگ کل به منظور مطالعه و تفکیک دگرسانی‌های گرمابی منطقه پی‌جویی آهن-مس (±طلا) کوه‌دم، ایران مرکزی"*، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته (۱۳۹۳) ۱۱، ۵۸ تا ۷۴.

[17] Ramdohr P., "*The ore minerals and their intergrowths*", Pergamon Press, (1980) 1205p.

[18] Cook N.J., Spry P.G., Vokes F.M., "*Mineralogy and paragenetic relationships among sulphosalts and related minerals in the Bleikvassli Zn-Pb-(Cu) deposit, Nordland, Norway*", Mineral Deposita (1998) 34, 35-56.

[19] Frost B.R., Mavrogenes J.A., Tomkins A.G., "*Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism*", Canadian Mineralogist (2002) 40, 1–18.

[20] Ciobanu C. L., Cook N. J., Damian F., Damian G., "*Gold scavenged by bismuth melts: an example from alpine shear remobilisates in the Highis-Massif, Romania*", Mineralogy and Petrology (2006) 87, 351–384.

[21] Tooth B., Ciobanu L.C., Green L., O'Neill B., Brugger J.I., "*Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study*", Geochimica et Cosmochimica Acta (2011) 75, 5423–5443.

[22] Skirrow R.G., Walshe J. L., "*Reduced and oxidised Au–Cu–Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek Inlier, Australia: an integrated geologic model*", Economic Geology (2002) 97, 1167–1202.

[23] Acosta-Góngora P., Gleeson S.A., Samson I.M., Ootes L., Corriveau L., "*Gold refining by bismuth melts in the iron oxide-dominated NICO Au-Co-Bi (±Cu±W) deposit, NWT, Canada*", Economic Geology (2015) 110, 291–314.

[24] Ciobanu C.L., Birch W.D., Cook N.J., Pring A., Grundler P.V., "*Petrogenetic significance of Au–Bi–Te–S associations: the example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia*", Lithos (2010) 116, 1–17.

[25] Cockerton A.B.D., Tomkins A.G., "*Insights into the liquid bismuth collector model through analysis of the Bi-Au Stortmont skarn prospect, northwest Tasmania*", Economic Geology (2012) 107, 667−682.

[26] Tooth B., Brugger J., Ciobanu C., Liu W., "*Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids*", Geology (2008) 36, 815–818.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.2.0]